

Литвинов Д.Н., Севастьянов М.М., Шумков Д.Е., Климова В.А., Таишыков О.Л.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК В ШАХТЕ-ХРАНИЛИЩЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА

Аннотация. Обоснована необходимость повышения надежности отвода остаточных тепловыделений от облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) в бассейнах выдержки и шахтах-хранилищах. Приведены примеры научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре «Атомные станции и ВИЭ», с использованием систем автоматизированного моделирования. В работе представлены цели и задачи работы по повышению надежности охлаждения шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок. В работе описано исследование эффективности отвода тепловыделений облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС), выгруженных из активной зоны реактора в шахту-хранилище, за счёт естественной циркуляции воды при обесточивании.

Ключевые слова: бассейн выдержки; конвекция; тепловыделяющие сборки; теплоноситель; теплообменник; исследовательский ядерный реактор.

Abstract. The necessity to improve the reliability of residual heat removal from the spent fuel assemblies (SFA) in the storage pools and storage pits. Examples of research projects carried out by the department «Nuclear power plants and renewable energy sources», with the use of automated modeling systems are given. The paper presents the aims and objectives of the work of improving the reliability of cooling of the spent fuel assemblies storage pit. It is described the investigation of the efficiency of residual heat removal from the irradiated fuel assemblies removed from the reactor core to the storage pit, due to the natural circulation of water, with deenergizing.

Keywords: spent fuel pool; convection; fuel assembly; coolant; heat exchanger; research nuclear reactor.

Введение

Ядерная безопасность установок определяется сохранением герметичности оболочек тепловыделяющих элементов как при работе реактора, так и при хранении облученных ТВС (ОТВС) в бассейне выдержки или шахте-хранилище. Для этого должно быть обеспечено надежное охлаждение ОТВС.

После аварии на Фукусиме во всех странах, эксплуатирующих ядерные установки, были разработаны дополнительные мероприятия для предотвращения разгерметизации ОТВС в бассейнах выдержки.

В связи с этим, была поставлена задача повышения надежности охлаждения шахты-хранилища исследовательской ядерной установки при хранении ОТВС, а также выгрузке всей активной зоны с использованием специального теплообменника. В рамках решения данной задачи были проведены экспериментальные исследования работы теплообменника в производственных условиях [1], [2].

В работе [1] приведены описание теплообменника охлаждения шахты-хранилища, результаты эксперимента по определению его характеристик.

Выполнена постановка задача компьютерного моделирования теплообменника для анализа его теплогидравлических характеристик. В докладе [2] были представлены результаты разработки компьютерной модели теплообменника, которая позволяет анализировать его теплогидравлические характеристики при разных параметрах среды, а также вносить изменения в конструкцию теплообменника и исследовать их эффективность. Для создания модели выбрана среда автоматизированного проектирования SolidWorks и ее приложение для анализа аэрогидродинамики и теплообмена Flow Simulation.

Для достижения целей моделирования решались следующие задачи:

- 1) создание твердотельной модели теплообменника;
- 2) определение параметров компьютерного моделирования в Flow Simulation и проведение верификационного расчета;
- 3) исследование расчетной сетки на предмет достаточной точности;
- 4) проведение численных экспериментов и анализ результатов.

Твердотельная модель состоит из корпуса, трубок змеевика и трубных досок. Так как в задачу исследования входит только теплогидравлический расчет, модель строилась с упрощениями. Например, крепежные болты и другие аналогичные элементы не учитывались. Также пренебрегли переходным элементом от спирали к стакану, который имеет небольшое отклонение от диаметрагиба спирали.

В данной работе рассмотрены вопросы моделирования режимов естественной циркуляции в шахты-хранилища облучённых топливных сборок (далее ОТВС) исследовательской ядерной установки (далее ИЯУ) в режиме полного обесточивания.

Моделирование теплогидравлических процессов с помощью стандартных программ производится для разработки мер по обеспечению надежного теплоотвода и путей повышения эффективности теплосъема остаточных тепловыделений, в том числе и в режимах полным обесточиванием собственных нужд.

Описание исследуемого объекта

Шахта-хранилище предназначена для хранения ОТВС, завершивших свой цикл работы в реакторе, и снижения тепловыделения сборок методом выдержки в постоянно циркулирующем теплоносителе [3]. Конструкция шахты показана на рисунке 1.

Существуют два эксплуатационных режима работы шахты-хранилища (табл. 1):

- режим нормальной эксплуатации, когда циркуляция теплоносителя

осуществляется по большому контуру.

- режим с максимальным принудительным охлаждением теплоносителя (функционирование шахты-хранилища ОТВС осуществляется по малому (среднему) контуру в условиях экстремальной оперативной выгрузки из реактора в шахту всех ТВС штатной активной зоны, что составляет до 42 ТВС, с повышенным остаточным тепловыделением).

Заметим, что по консервативным оценкам, суммарное энерговыделение ОТВС может составлять около 200 кВт.

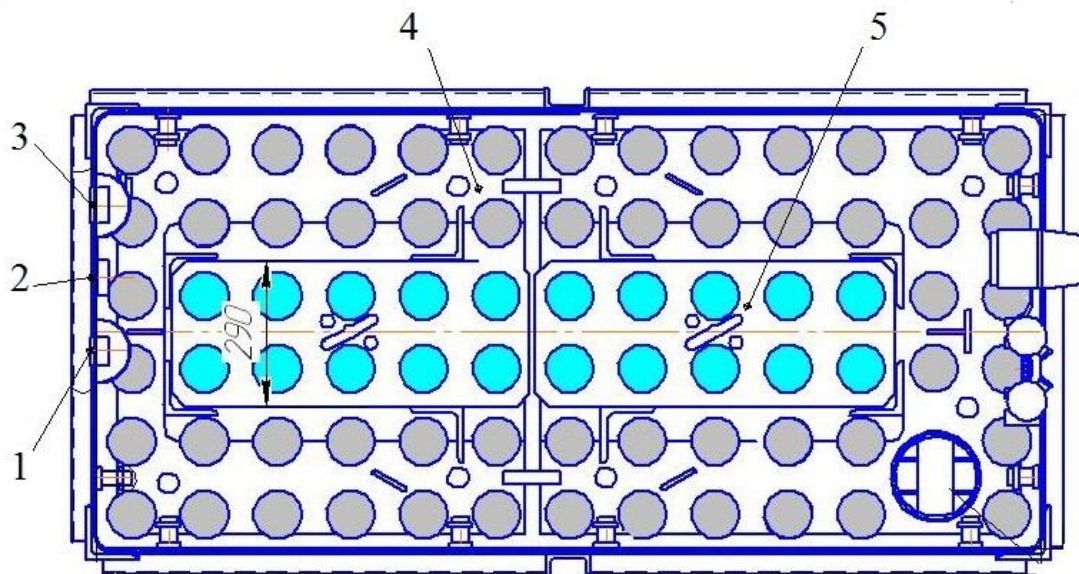


Рисунок 1 – Шахта-хранилище (вид сверху): 1 – перелив; 2 – подпитка; 3 – слив воды на очистку; 4 – стационарный сепаратор; 5 – съемный сепаратор

Режим работы, исследуемый в данной работе, является отклонением от условий и пределов нормальной эксплуатации шахты-хранилища ОТВС, с отключением электроснабжения, приводящее к обесточиванию оборудования.

Таблица 1 – пределы эксплуатационные и безопасной эксплуатации шахты-хранилища

Наименование параметра рабочей среды	Эксплуатационные пределы	Пределы безопасной эксплуатации
	Минимум	Максимум
Максимальная нагрузка ОТВС	–	228
Температура теплоносителя в шахте-хранилище, °С	70	90
Ежесуточная убыль теплоносителя, м³	До 0,028	До 0,056
Понижение уровня теплоносителя, мм	119	200
Температура теплоносителя на выходе из теплообменника, °С	50	70
Давление технической воды на выходе из теплообменника, МПа	0,4	0,5

Основными элементами шахты-хранилища являются:

1) Бак шахты-хранилища ОТВС – представляет собой корпус прямоугольной формы. Стенки и днище бака выполнены из нержавеющей листовой стали типа 12Х18Н10Т, толщина стенок 4 мм, толщина днища 10 мм;

2) Стационарный сепаратор, предназначенный для размещения ОТВС и представляет собой конструкцию из алюминиевых труб, в которых размещаются ОТВС, которые связаны трубными решётками сверху и внизу, для жёсткости конструкции;

3) Съёмный сепаратор, предназначен для размещения ОТВС. Он меньше по размерам стационарного сепаратора, что позволяет их использовать в любой момент работы реактора и устанавливать в свободное пространство стационарных сепараторов.

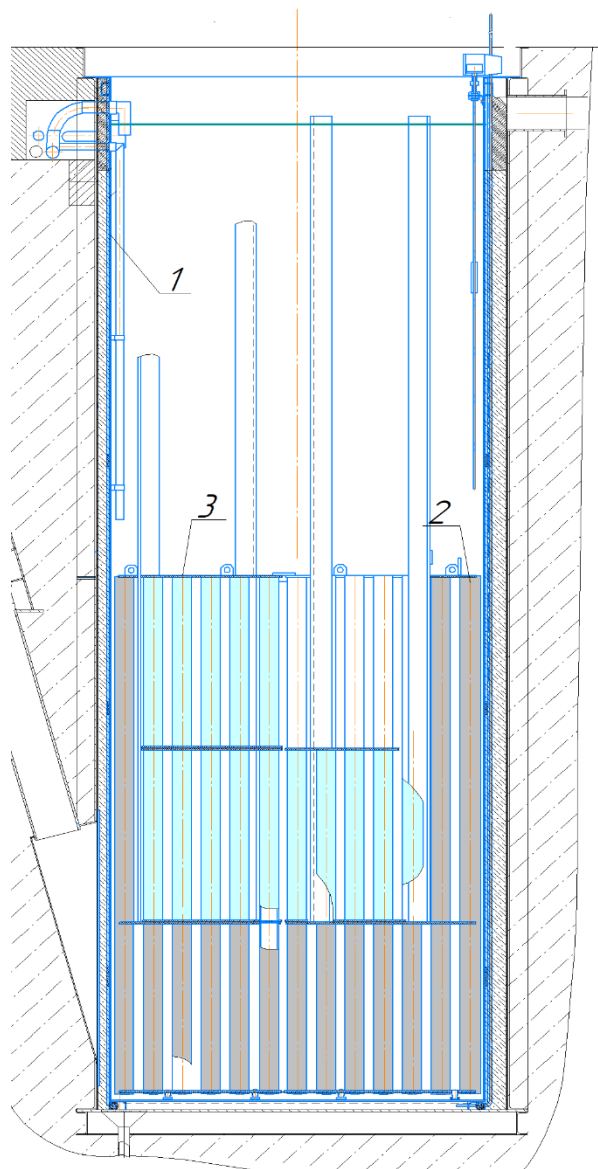


Рисунок 2 – Шахта-хранилище (вертикальный разрез): 1 – бак шахты-хранилища ОТВС; 2 – стационарный сепаратор; 3 – сепаратор съёмный

Методика исследования

Целью исследования является расчетное определение температурного режима внутри бака шахты-хранилища в режиме обесточивания.

Установлены следующие задачи исследования:

- построение модели бака шахты-хранилища ОТВС;
- выполнение теплогидравлического расчёта.

Объектом исследования является режим работы шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок, который подразумевает собой обесточивание, либо выход из строя всех систем циркуляции теплоносителя в баке шахты. Исследование проводилось в программном комплексе системы автоматизированного проектирования SolidWorks и в его прикладном модуле SolidWorks Flow Simulation, предназначенном для анализа гидродинамики и теплообмена [4], [5].

Этапы исследования были следующими:

1) Построение модели объекта исследования

Построение трёхмерной модели основного оборудования, полностью повторяющей размеры исследуемого объекта. Модель является упрощенной: были исключены элементы шахты-хранилища, не влияющие на естественную циркуляцию теплоносителя, с целью уменьшения времени расчёта необходимых для исследования параметров в прикладном модуле Solidworks Flow Simulation.

2) Формирование исходных данных для расчета в модуле Flow Simulation

Были заданы следующие параметры:

- создано условие «реальная стенка», позволяющее рассчитать теплообмен между двумя средами;
- на границе сред теплоносителя и воздушной области задана температура воздуха 30 °С – соответствует значению температуры помещения при отключенной вентиляции;
- суммарное тепловыделение ОТВС – 273 кВт;

На рисунке 3 представлены траектории движения потоков теплоносителя и распределение температур при естественной циркуляции в объеме шахты-хранилища.

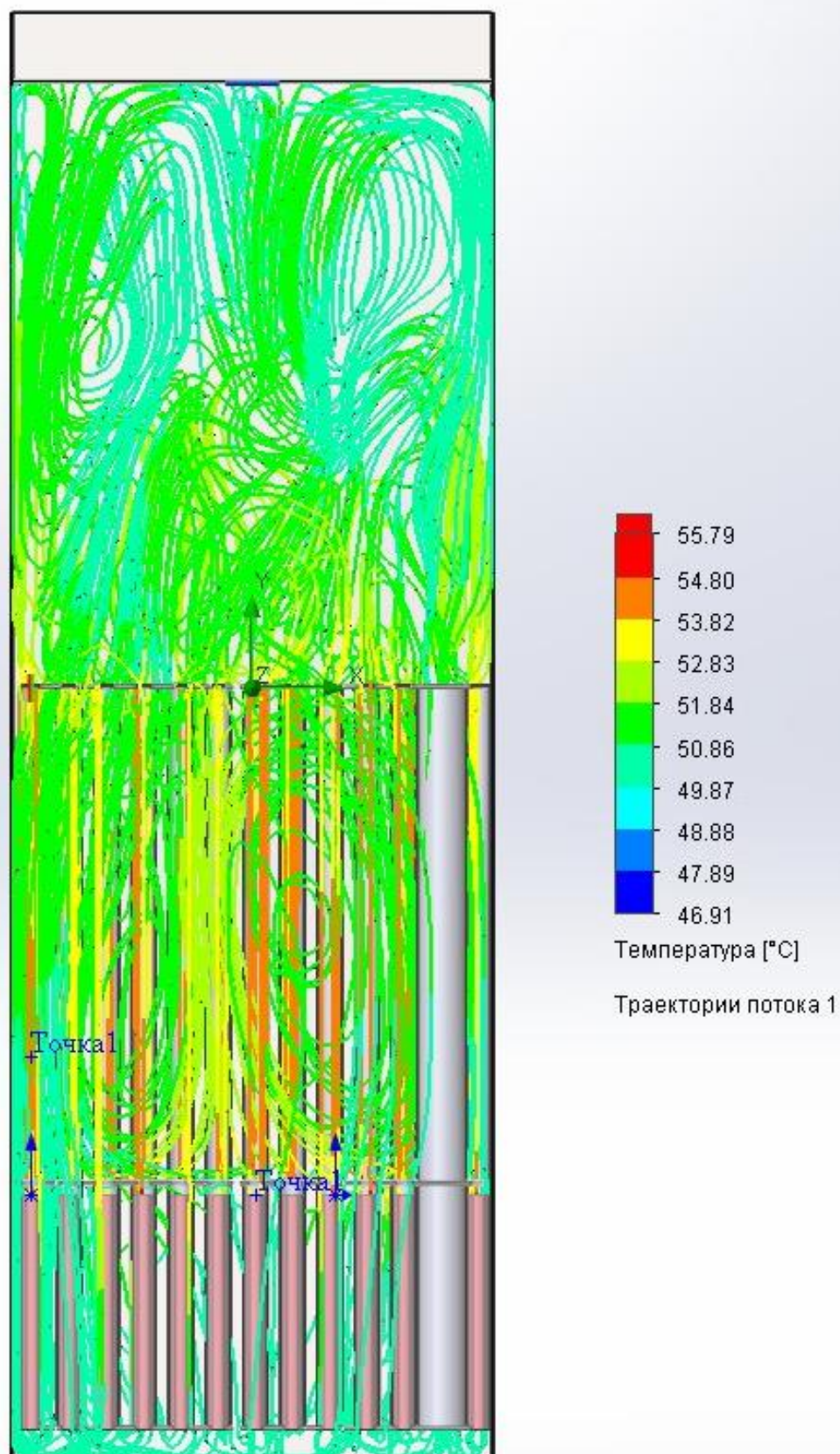


Рисунок 3 – Траектории потоков теплоносителя при естественной конвекции

Заключение

В результате проведенных работ по моделированию процесса отвода остаточных тепловыделений в режиме естественной циркуляции в программном комплексе системы автоматизированного проектирования SolidWorks и в его прикладном модуле SolidWorks Flow Simulation было определено, что в режиме частичной загрузки первого яруса шахты хранилища, максимальная температура теплоносителя (65,81 °C) была достигнута через 1680 секунд (28 минут).

При полной загрузке первого яруса шахты-хранилища, изменение температура воды растет и стабилизируется на уровне 96 °C. Было определено, что через 211 с возможно возникновение поверхностного кипения на отдельных ТВС с теплоносителем.

Наличие большого объема воды в шахте-хранилище позволяет аккумулировать значительное количество теплоты и обеспечить надежное охлаждение ОТВС в течение времени, необходимого для включения источников надежного питания и подключения насосов расхолаживания. Большая площадь поверхности раздела воды и воздуха также способствует отводу теплоты за счет испарения. Увеличение разности давлений и температур между нижней и верхней точками теплоносителя в шахте увеличивает степень естественной циркуляции, турбулентность потоков.

Библиографический список

1. Шумков Д. Е. Задача повышения надежности расхолаживания шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок / Д. Е. Шумков, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016 : материалы науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 11 окт. 2016 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 42–44
2. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок ИЯР ИВВ-2М в шахте-хранилище / Д. Е. Шумков [и др.] // Физика. Технологии. Инновации ФТИ–2017 : тез. докл. IV Междунар. молодежной науч. конф. Секции 3, 4, 5 (15–19 мая 2017 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 122–123
3. Исследование эффективности отвода остаточных тепловыделений облученных топливных сборок в шахте-хранилище исследовательского реактора / Д. Н. Литвинов [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / под ред. В. Ю. Балдина [и др.]. – Екатеринбург, 2017 – С. 842–845

4. Алямовский А. А. Solidworks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
5. Официальное справочное пособие по Solidworks [Electronic resource]. – Mode of access: <http://help.solidworks.com>